

DOI: 10.20103/j.stxb.202305151022

程唱, 蔡有柱, 赵丽娟, 邹星晨, 张泽鑫, 刘欣悦, 贺康宁. 祁连山林区基于水源涵养能力的人工林近自然度评价体系建立. 生态学报, 2024, 44(7): 2971-2980.

Cheng C, Cai Y Z, Zhao L J, Zou X C, Zhang Z X, Liu X Y, He K N. Establishing near-naturalness evaluation system of artificial forest based on water conservation ability in the outer edge of Qilian Mountains in Qinghai Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2971-2980.

祁连山林区基于水源涵养能力的人工林近自然度评价体系建立

程 唱^{1,2,3}, 蔡有柱⁴, 赵丽娟⁴, 邹星晨^{1,2,3}, 张泽鑫^{1,2,3}, 刘欣悦^{1,2,3}, 贺康宁^{1,2,3,*}

1 北京林业大学水土保持学院水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

2 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083

3 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083

4 大通回族土族自治县宝库林场, 西宁 810100

摘要: 建立近自然度评价体系对于修复森林生态功能、保障森林可持续发展有着重要的意义, 然而近自然度尚未有统一的评价体系。祁连山地区的森林系统承担着我国西部重要的水源涵养功能, 对其现存的人工林客观地开展基于水源涵养能力的近自然评价是亟需解决的问题。以祁连山东部金禅沟、塔尔沟小流域 40 个不同林分起源的云杉纯林、白桦纯林、云杉白桦混交林为对比研究样地, 对涉及近自然度和水源涵养能力的指标进行敏感性分析, 筛选出中高敏感度指标, 通过欧氏距离法结合熵权法定量评价人工林近自然度, 通过模糊物元法定量评价森林水源涵养能力, 然后采用 6 种方法对近自然度和水源涵养得分分布进行拟合 ($R^2 > 0.4$), 并利用 K-means 法建立了 4 个近自然度评价等级。研究表明祁连山东部地区大部分人工林近自然度评级处于半天然林阶段, 通过改造纯林为针阔混交林可以同时提高其近自然度与水源涵养能力。研究旨在构建基于水源涵养能力的近自然度评价体系, 为森林生态服务功能修复提供理论支持。

关键词: 天然林; 人工林; 水源涵养能力; 近自然度

Establishing near-naturalness evaluation system of artificial forest based on water conservation ability in the outer edge of Qilian Mountains in Qinghai Province

CHENG Chang^{1,2,3}, CAI Youzhu⁴, ZHAO Lijuan⁴, ZOU Xingchen^{1,2,3}, ZHANG Zexin^{1,2,3}, LIU Xinyue^{1,2,3}, HE Kangning^{1,2,3,*}

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation State Forestry Administration, Soil and Water Conservation College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China

3 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Baoku Forest Farm, Datong Hui Tu Autonomous County, Xining 810100, China

Abstract: The evaluation of near-naturalness is a widely discussed topic at present. It is of great significance to restore forest ecological function and protect forest sustainable development by establishing a near-naturalness evaluation system. However, there is no unified evaluation system for forest near-naturalness. This study focuses on the construction of near-natural evaluation based on water conservation capacity and provides theoretical support for the restoration of forest ecosystem services. In order to explore the management mode of near-natural forests, this paper takes the artificial forest in

基金项目: 低效退化天然白桦林分结构调整和功能提升技术与示范 (2022-SF-160)

收稿日期: 2023-05-15; 网络出版日期: 2024-01-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hkn@bjfu.edu.cn

the outer edge of Qilian Mountains in Qinghai as a case study. The forest in Qilian Mountains plays an important role for water conservation in western China. However, in the early stage, some plantations were planted according to the timber forest structure. As a result, there are widespread problems such as poor stability of forest system, low water conservation function, and difficulty in sustainable development of forests. It is an urgent problem to objectively evaluate the water conservation capacity of existing plantations and explore the near-natural management measures of forests. In this study, 40 spots planted with the *Picea crassifolia* Kom. forest, *Betula platyphylla* Suk. Forest, and *Picea crassifolia* Kom. and *Betula platyphylla* Suk mixed forest with different stand origins in Jinchangou and Talgou small watershed in the eastern Qilian Mountains were investigated. Sensitivity analysis was carried out on the indexes related to naturalness and water conservation ability, and the medium and high sensitivity indexes were selected. The forest water conservation function was evaluated quantitatively by fuzzy matter element method, and the near-natural degree of artificial forest was evaluated quantitatively by Euclidean distance method combined with the entropy weight method. Six methods were used for regression fitting ($R^2 > 0.4$) of near-naturalness and water conservation scores, and four near-naturalness evaluation levels were established by K-means method. The results showed that most of the artificial forests in the eastern Qilian Mountains were in the semi-natural forest stage, and the near-naturalness and water conservation ability of the pure forests could be improved by transforming them into mixed forests. In the meanwhile, the study demonstrated that the forests in the semi-natural stage were the key object of forest transformation. By transforming semi-natural forests, the water conservation capacity of local forests can be greatly improved. In addition, the study still needs to investigate the near-natural forests to improve the progress of the evaluation system and further explore the near-natural forest management measures for semi-natural forests.

Key Words: natural forest; plantation forest; water conservation function; degree of nearness

森林是陆地生态系统的主体,是人类和多种生物赖以生存和发展的基础。水源涵养功能是森林重要的生态功能^[1],陆地 90%以上的淡水资源均由森林涵养^[2]。伴随着人类社会的进步与发展,人类对水的需求不断增加,森林生态系统的破坏以及不合理的营林措施进一步加剧了水资源短缺的问题^[3]。营造水源涵养功能主导的人工林,并对其进行近自然经营也越来越受到人们的高度重视^[4]。“森林近自然经营”是在“法正林”学说基础上发展起来的一种新的森林经营理念,其核心为森林生态系统的稳定性、生物多样性和系统多功能的缓冲能力^[5]。对森林进行近自然度评价,确定生态系统恢复的参考标准已经成为全球的热点话题^[6]。然而,由于各地区历史背景、实际情况不同,目前国内外针对近自然度的评价尚未形成一致的体系^[7]。结合森林生态功能,探究保障森林主要生态功能的近自然经营模式更鲜见报道。基于水源涵养能力构建近自然度评价体系对于修复人工林水源涵养能力,探索水源涵养林近自然经营道路意义重大。

现有的研究普遍基于林分结构、状态特征对森林进行近自然度划分,评价体系难以反映森林的主要生态功能以及指导森林的近自然经营,评价方法多使用层次分析法,存在主观性较强的问题。赵中华^[8]基于林分状态特征对红松林、锐齿栎进行评价,将森林自然度划分为 7 个不同的等级;彭舜磊^[9]运用层次分析法建立了秦岭地区的近自然度评价指标体系,将森林类型近自然度划分为 5 个等级;刘常富^[10]建立了城市森林近自然度综合评价体系,将自然度划分为 4 个等级;许沼山^[11]通过层次分析法对海岛植被进行近自然度评价,本研究通过欧氏距离法与熵权法相结合的方法,对各指标进行敏感性筛选,能够客观、有效地建立近自然度评价体系,且将近自然度评价与水源涵养能力评价相结合,对于识别不同自然度的水源涵养林,保障其可持续发展具有重要的意义。

青海祁连山东部地区分布有众多河流,是重要的水源涵养区。林区外沿人工林由于初期按用材林结构种植,后期划归为生态公益林,普遍存在森林系统稳定性差、水源涵养功能低、森林难以可持续发展等问题,构建一套基于水源涵养能力的森林近自然度评价体系对于当地造林和营林有着重要的意义。

1 试验地概况

本研究在青海省祁连山东部大通县的塔尔沟小流域、互助县的金禅沟小流域($36^{\circ}4'—39^{\circ}21'N, 92^{\circ}53'—103^{\circ}1'E$)两个试验区进行。祁连山位于青藏高原、蒙古高原和黄土高原的交汇处,平均海拔 1310—5821 m。试验点的年平均气温分布为 $1.2—4.2^{\circ}C$,年平均降水量分布为 410—510 mm,年平均蒸发量分布为 1148.3—1465.9 mm,土壤类型主要为山地棕壤、山地栗壤、山地灰棕壤等;青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)等为当地的主要树种,目前祁连山东部地区承担着重要的水源涵养功能。

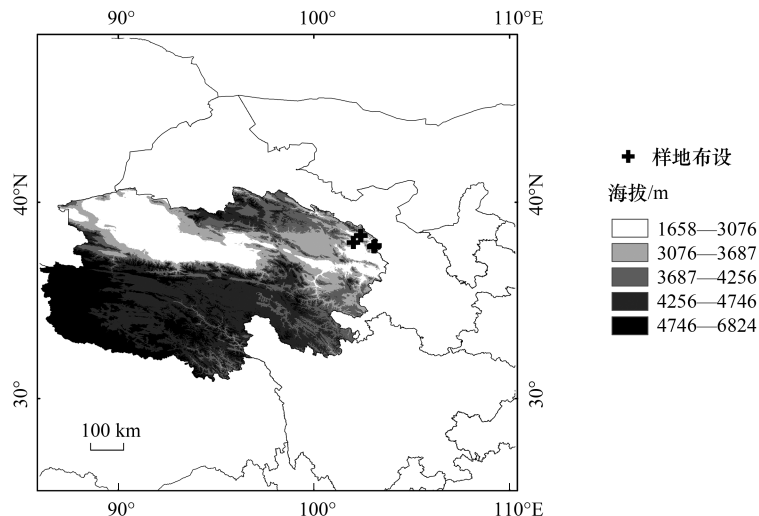


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

2 材料与方法

2.1 样地设置与调查

实验于 2021 年和 2022 年的 5—9 月份(植物生长季)进行,调查树种为青海云杉纯林、白桦林纯林、青海云杉白桦混交林。本次调查共建立了 40 个样地($24\text{ m}\times 24\text{ m}$),其中 20 个为天然林样地,20 个为人工林样地,两种林分起源的样地树种类型均为青海云杉纯林、白桦纯林、青海云杉白桦混交林,人工林龄组均为中龄林,天然林龄组为中龄林、近成熟林。我们对样地中的所有树木编号并进行每木检尺,调查了每棵树的树高、胸径、位置、冠幅等基本信息,并记录了相应的海拔、坡度、坡向等研究样地概况信息,详见表 1。

2.2 水源涵养指标

森林的水源涵养能力主要由林冠层、枯落物层和土壤层的蓄水保水能力体现;林冠层选取林冠高度、冠层持水量^[12]2 个指标;枯落物层选取枯落物厚度、枯落物储量、枯落物持水能力 3 个指标,其中枯落物厚度、储量采用五点取样法(样方 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$)测定^[13],枯落物持水能力采用室内浸泡法测定^[14],土壤层选取毛管孔隙度(0—20 cm、0—60 cm 土层)、非毛孔隙度(0—20 cm、0—60 cm 土层)、饱和导水率(0—20 cm、0—60 cm 土层)6 个指标,结合前人研究,本研究区样地土壤厚度分布约为 60 cm,其中 0—20 cm 土壤为表层土壤,受植物根系影响较大,因此选取 0—20 cm、0—60 cm 厚度土壤层指标表征土壤物理性质,毛管孔隙度、非毛管孔隙度测定采用环刀法^[15],饱和导水率测定采用定水头法^[16]。

2.3 近自然指标

近自然指标至今尚没有一个统一的标准,针对不同的研究背景,不同学者采用不同的指标、方法。综合国内外主流观点,本研究从林分结构、生物多样性、林下更新状况、干扰程度、森林稳定性 5 个方面,从郁闭

度^[17]、角尺度^[18]、混交度^[19]、大小比数^[20]、结构类型、单位面积蓄积量^[21]、灌草多样性(Shannon-Wiener 多样性指数^[22])、自然更新、枯倒木比例^[23]、人为干扰程度、病虫害害程度^[24]、火险等级^[25]共 13 个指标,构建如图 2 所示人工林近自然度评价指标体系。

表 1 研究样地概况

Table 1 Overview of the spots

林分起源 Origin of forest stands	林分类型 Type of stand	样地数量 Number of plots	平均树高 Average height/m	平均胸径 Average DBH/cm	海拔分布 Elevation distribution/m	坡度分布 Slope distribution/(°)
天然林 Artificial forest	云杉纯林 <i>Picea crassifolia</i> Kom.	7	16.72±0.84	20.85±0.74	2419—2678	10—29
	白桦纯林 <i>Betula platyphylla</i> Suk.	2	14.11±0.66	23.69±0.26	2610—2869	20—37
	云杉白桦混交林 <i>Picea crassifolia</i> Kom.× <i>Betula platyphylla</i> Suk.	11	15.03±0.57	23.56±0.48	2470—2869	24—30
人工林 Natural forests	云杉纯林 <i>Picea crassifolia</i> Kom.	5	11.70±0.35	15.61±0.39	2459—2622	0—30
	白桦纯林 <i>Betula platyphylla</i> Suk.	5	10.87±0.41	12.83±0.64	2642—2944	14—26
	云杉白桦混交林 <i>Picea crassifolia</i> Kom.× <i>Betula platyphylla</i> Suk.	10	11.25±0.29	15.93±0.55	2756—2940	10—21

DBH: 胸径 Diameter at breast height

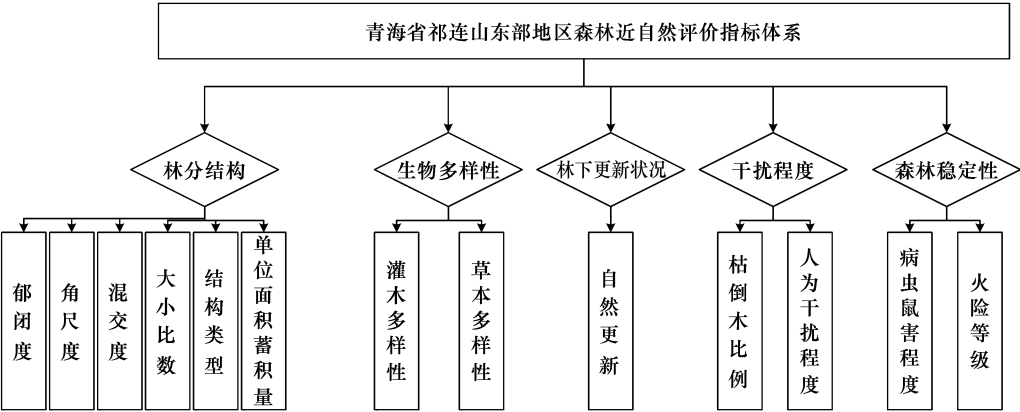


图 2 近自然评价指标体系

Fig. 2 Near-nature evaluation index system

结合相关研究^[26],将自然更新、人为干扰程度和结构类型确定为定性指标,每个指标分 I、II、III 级,从 I 级至 III 级赋值分别为 0、0.38 和 0.62。自然更新株数大于 50 株/hm²时,为 III 级,自然更新株数在 1 至 50 株/hm²之间时,为 II 级,自然更新株数小于 1 株/hm²时,为 I 级;人迹罕至,很难抵达的地方,且几乎没有人类活动踪迹为 I 级;很难抵达,但有人类活动踪迹为 II 级;容易抵达,且明显具有人类活动踪迹为 III 级;将林分垂直结构划分为乔木层、灌木层、草本层,同时包含 3 个层次的结构类型为 III 级,包含 2 层的结构类型为 II 级,仅有 1 层的结构类型为 I 级。

2.4 水源涵养能力和近自然评价方法

对各指标进行敏感性分析,变异系数 CV<0.3 为低敏感,0.3<CV<0.6 为中敏感, CV>0.6 为高敏感,筛选出中高敏感性的指标;运用物元分析理论,通过欧式贴近度模糊物元模型,对不同造林类型的水源涵养能力进行评价^[27];通过欧式距离法和熵权法^[28]分别对人工林近自然度进行评价,将所得数据标准化后并求取平均值。

标准化方法为:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中, x' 为标准化后的值, x 为原始数据, $x_{\min}$ 为最小值, $x_{\max}$ 为最大值。除病虫鼠害程度、火险等级、人为干扰度、枯倒木比例外其余指标均为正向指标。

欧式距离表达式为:

$$d(x,y) : = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2}$$

式中, $d(x,y)$ 为点 (x_1,y_1) 与点 (x_2,y_2) 之间的欧式距离。

2.5 数据处理与分析

运用 SPSS 25.0、Arcmap 10.6 对获取数据进行处理,对林分水源涵养能力和近自然度进行评价,采用六种最常用的方法对两者进行拟合,确定最优拟合,利用 K-means 聚类分析划分 4 类近自然度等级,作图使用 Origin 2019。

3 结果与分析

3.1 不同起源林分水源涵养能力评价

表 2 中,人工林水源涵养能力中、高敏感性的指标有林冠高度、冠层持水量、枯落物厚度、枯落物储量、枯落物持水能力、土壤非毛管孔隙度(0—20 cm)、土壤非毛管孔隙度(0—60 cm)、土壤饱和导水率(0—20 cm)、土壤饱和导水率(0—60 cm);天然林水源涵养中、高敏感性的指标有林冠高度、冠层持水量、枯落物厚度、枯落物储量、枯落物持水能力、土壤饱和导水率(0—20 cm)、土壤饱和导水率(0—60 cm)。

表 2 祁连山东部地区水源涵养能力评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of water conservation ability in eastern Qilian Mountains

林分起源 Origin of forest stands	植被水源涵养能力指标体系 Vegetation water source conservation ability index system	算术平均值 Arithmetic mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	敏感性 Sensibility
人工林 Artificial forest	林冠高度/m	6.35	2.81	0.44	中敏感
	冠层持水量/mm	0.83	0.31	0.38	中敏感
	枯落物厚度/cm	3.13	1.74	0.56	中敏感
	枯落物储量/(g/m ³)	516.69	191.69	0.37	中敏感
	持水能力/(g/g)	1.83	0.97	0.53	中敏感
	土壤毛管孔隙度(0—20 cm)/%	52.23	8.66	0.16	低敏感
	土壤毛管孔隙度(0—60 cm)/%	51.98	7.27	0.14	低敏感
	土壤非毛管孔隙度(0—20 cm)/%	4.13	2.87	0.70	高敏感
	土壤非毛管孔隙度(0—60 cm)/%	3.80	2.54	0.67	高敏感
	土壤饱和导水率(0—20 cm)/(cm/h)	8.35	9.85	1.18	高敏感
天然林 Natural forest	土壤饱和导水率(0—60 cm)/(cm/h)	3.25	2.76	0.85	高敏感
	林冠高度/m	6.67	3.02	0.48	中敏感
	冠层持水量/mm	0.79	0.30	0.38	中敏感
	枯落物厚度/cm	3.16	1.66	0.53	中敏感
	枯落物储量/(g/m ³)	574.59	192.33	0.37	中敏感
	持水能力/(g/g)	2.42	2.31	1.26	高敏感
	土壤毛管孔隙度(0—20 cm)/%	55.22	8.76	0.16	低敏感
	土壤毛管孔隙度(0—60 cm)/%	53.59	8.67	0.16	低敏感
	土壤非毛管孔隙度(0—20 cm)/%	5.85	1.70	0.29	低敏感
	土壤非毛管孔隙度(0—60 cm)/%	4.52	1.22	0.27	低敏感
	土壤饱和导水率(0—20 cm)/(cm/h)	13.98	16.16	1.17	高敏感
	土壤饱和导水率(0—60 cm)/(cm/h)	10.84	17.87	2.14	高敏感

为确保评价体系敏感性较强、评价标准一致,选取不同林分起源的中、高敏感性的指标构建水源涵养能力评价体系,评价结果如图 3 所示。

40 个样地中,20 个样地为天然林、20 个样地为人工林,人工林中 9 个纯林算术平均得分为 0.47,11 个混交林算术平均得分为 0.51。

由图 3 可得,人工林水源涵养能力得分均值为 0.49,分布范围为 0.30—0.65,天然林水源涵养能力得分均值为 0.59,分布范围为 0.37—0.75,天然林水源涵养能力得分整体高于人工林 20.41%。

3.2 人工林近自然度评价

如表 3 所示,各近自然指标中,表现为中敏感性的指标有自然更新、单位面积蓄积量、病虫害害程度、人为干扰程度、结构类型,高敏感性的指标有混交度、灌木多样性、草本多样性、枯倒木比例。以筛选出的中高敏感性指标作为人工林近自然度的评价指标,考虑到天然林生长状态的差异性,以其平均状态(各指标平均值)作为近自然度衡量的标准,通过欧式距离计算各人工林距天然林平均状态的差距,结合熵权法确定近自然度评价得分,得分见图 4。

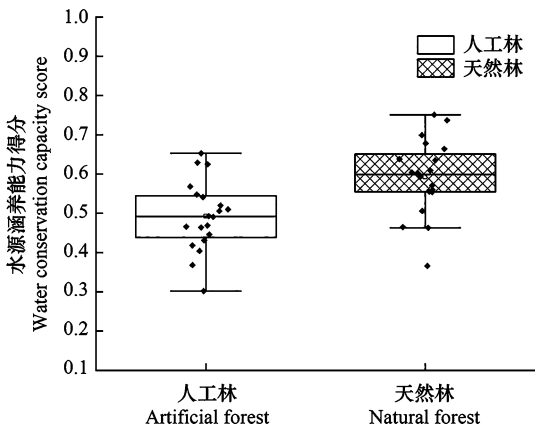


图 3 40 个不同林分起源样地的水源涵养能力得分对比

Fig.3 Comparison of water conservation ability scores of 40 different stands origin plots

表 3 祁连山东部地区 20 个人工林样地近自然度评价指标体系

Table 3 Index system of near-naturalness evaluation of 20 plantation plots in eastern Qilian Mountains

植被近自然度指标 Vegetation near naturalness index	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	敏感性 Sensibility
郁闭度 Canopy density/%	0.68	0.07	0.10	低敏感
角尺度 Uniform angle index	0.41	0.09	0.22	低敏感
混交度 Mixed degree	0.07	0.12	1.75	高敏感
大小比数 Neighborhood comparison	0.48	0.12	0.25	低敏感
灌木多样性 Shrub diversity	0.17	0.09	1.83	高敏感
草本多样性 Herbal diversity	0.63	1.07	1.70	高敏感
自然更新 Natural regeneration/(株/hm ²)	0.45	0.19	0.42	中敏感
单位面积蓄积量 Volume per unit area/(m ³ /hm ²)	156.25	90.63	0.58	中敏感
病虫害害程度 Degree of disease, insect pest and mouse plague	0.67	0.26	0.39	中敏感
火险等级 Fire danger rating	0.54	0.11	0.21	低敏感
人为干扰程度 Degree of human interference	0.65	0.28	0.43	中敏感
结构类型 Structure type	0.81	0.27	0.33	中敏感
枯倒木比例 Proportion of withered and fallen trees/%	2.91	3.98	1.36	高敏感

对不同林型的人工林得分求取算术平均值,云杉人工纯林平均得分为 0.49、白桦纯林平均得分为 0.44,云杉白桦混交林平均得分为 0.55,人工林针阔混交林得分大于人工林纯林。

此外,如图 4 所示,祁连山地区人工林自然度得分分布呈正态曲线,70%的样地得分均在 0.4—0.6 间。

3.3 基于水源涵养能力的近自然度等级的划分

对各指标进行共线性检验(VIF)排除各指标间的多重共线性关系(VIF<10),上述中、高敏感指标均不存在多重共线关系。研究使用了几种最常用的拟合方式,确定水源涵养能力得分与林分近自然度得分的拟合关

系。如图 5,拟合 R^2 最高的为高斯 (Gauss) 拟合和逻辑 (Logistic) 拟合, R^2 值均为 0.46 ($P < 0.05$); 得分次之为二阶多项式拟合和线性拟合, 线性拟合 R^2 值分别为 0.35 和 0.30 ($P < 0.05$), 拟合度最低的为对数 (Logarithm) 拟合和指数 (Exponential) 拟合。

结合国内外对森林近自然度分级标准以及近自然度评价体系中高敏感性指标, 利用 K-means 聚类分析法, 将祁连山主要森林类型近自然度划分为 4 个等级, 各等级森林类型林分特征见表 4。等级 1 的人工林为 1 个云杉纯林样地, 等级为 2 的人工林包括 4 个云杉纯林和 1 个白桦纯林样地, 等级为 3 的人工林包括 6 个云杉白桦混交林和 4 个白桦纯林样地, 等级为 4 的人工林为 4 个云杉白桦混交林样地。所有样地中等级 1 的人工林占比为 5%, 等级 2 的人工林占比为 25%, 等级 3 的人工林占比为 50%, 等级 4 的人工林占比为 20%。等级 1 和的等级 2 的林分均为纯林, 等级 3 中混交林占比 60%。等级 4 均为混交林。

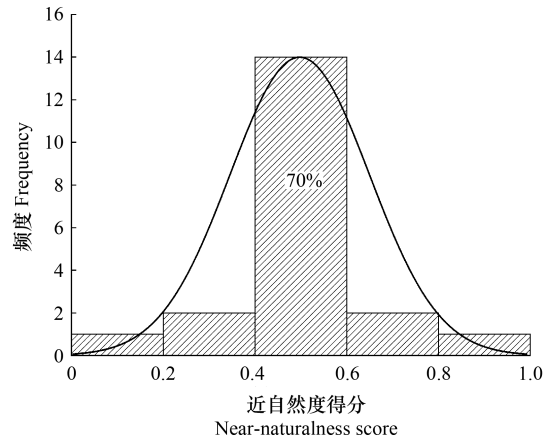


图 4 人工林近自然度得分分布直方图

Fig.4 Histogram of near-naturalness score distribution of artificial forest

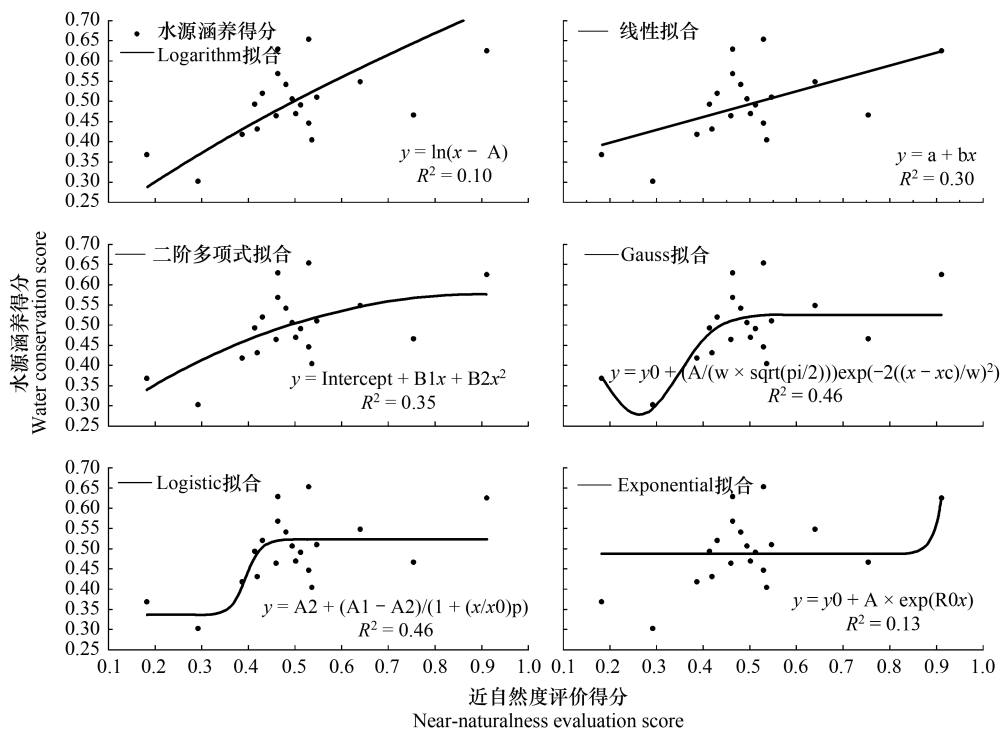


图 5 20 个人工林样地林分近自然度与水源涵养能力得分的拟合关系

Fig.5 The fitting relationship between near-naturalness of stands and water conservation ability score of 20 plantation plots

Logarithm: 对数函数; Gauss: 高斯函数; Logistic: 逻辑函数; Exponential: 指数函数; exp: 指数运算; sqrt: 平方根运算; Intercept: 截距; pi: 圆周率

4 讨论

4.1 祁连山东部地区人工林和天然林水源涵养能力对比

研究表明, 天然林水源涵养能力高于人工林, 天然林林冠层的树冠高度, 枯落物层的枯落物厚度、储量、持

水能力,土壤层的毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和导水率均高于人工林。这是因为天然林林龄大,林下组成复杂,生物组成丰富,枯落物归还量大^[32-33]。土壤保水能力可以通过毛管孔隙度及非毛管孔隙度体现,土壤蓄水、保水能力是评价水源涵养能力的重要指标^[34]。天然林土壤质量更好,是因为天然林根系发达,能够及时容纳降水,林下草本能够减少地表径流冲刷^[35]。研究区天然林林冠层截留量略小于人工林,与前人研究不一致^[36]。这是由于天然林林分密度相较于人工林普遍较低,且云杉林占比较大,且由于树种特性,针叶林叶片表面积小于阔叶林,导致云杉天然林叶片总表面积小于云杉白桦混交人工林。此外,研究结果还表明了人工林中针阔混交林水源涵养能力优于纯林,与前人研究一致^[37-38]。这是因为混交林空间结构完整,枯落物组成丰富,能够形成更加深厚的腐殖质层,并有效改善土壤质量^[39-40]。

表 4 青海祁连山林区主要人工林近自然度分级标准

Table 4 Classification standards of the near naturalness of the main artificial forest types in Qilian Mountains

近自然得分 Near-natural score	等级 Degree	等级评价 Degree evaluation	林分特征 Stand characteristics
<0.24	1	人工	多为用材林结构,树种组成单一、林下植物稀缺,几乎无自然更新,初期经人为干预可发挥单一功能,分类经营后水源涵养能力非常低。
0.24—0.45	2	远天然	多起源于退耕还林工程 ^[29] ,树种组成单一、多为纯林,林下植物较少,自然更新很差,森林存在病虫害,缺乏自然稀疏的能力,分类经营后水源涵养能力很低。
0.45—0.54	3	半天然	多起源于三北防护林工程 ^[30] ,树种组成逐渐丰富,开始有混交林出现,林下植物较多,自然更新一般,分类经营后能够发挥一定的水源涵养能力。
>0.54	4	近天然	林下植物丰富,自然更新较好并朝向天然林演替,逐渐形成复层、异龄、混交的结构,能够实现多种综合生态功能,水源涵养能力较高。

“人工”、“远天然”、“半天然”、“近天然”概念引用前人提出^[31]

4.2 祁连山东部地区人工林近自然度现状及功能提升

研究表明,祁连山东部地区大部分人工林近自然度评级处于半天然阶段,水源涵养能力得分在 0.4—0.5 之间,人工林水源涵养能力得分普遍低于天然林得分平均值,与前人研究结果一致^[41]。人工林林分近自然度和水源涵养能力的 Gauss 拟合 $R^2 = 0.46$ ($R^2 > 0.4, P < 0.05$),但是由于研究区缺乏近成熟、成熟龄组的人工林,近自然度 >0.54 后的拟合曲线仍需进一步实验证明。由图 5 可知,当林分近自然度 <0.54 时,林分近自然度越高其水源涵养能力越好,当林分近自然度 <0.45 时,伴随林分近自然的提高其水源涵养能力迅速增加,当林分近自然度在 0.45—0.54 之间时,伴随林分近自然的提高其水源涵养能力提升缓慢。这是因为当林分近自然度较高时,其结构完整,林下植被丰富,存在自然更新,森林病害较少、稳定性较高,有利于改善土壤,促进林分生长进而提升其水源涵养能力^[42]。当人工林近自然度评级处于人工或远天然林阶段时森林结构极不完整,纯林所占比重极大,通过补植完善其森林结构能大幅度提高其水源涵养能力,是森林生态功能修复的关键对象。当人工林近自然度评级为半天然林时树种逐渐丰富,需要进一步进行结构调整以提高其水源涵养能力。该研究结果与实际情况、前人研究结果均一致,证明该评价等级能够应用于祁连山及相近地区^[43]。研究表明混交林近自然度高于纯林,这是由于混交林森林群落结构更完整,能够促进林分自然更新,提高森林稳定性,对于中龄组人工林通过补植改造纯林为混交林能够提高其近自然度^[44]。同时,结果表明混交比例是近自然度评价体系中的高敏感指标,因此,进一步研究适宜混交比例对于半天然林的近自然经营具有重要意义。相较于前人的研究,本文将森林近自然度与水源涵养能力相结合,对水源涵养人工林进行近自然度评价,识别其近自然等级,并进行分类改造,对于修复远天然林水源涵养能力,提高半天然人工林水源能力可持续发展的能力具有重要的意义。同时,利用欧式距离法和熵权法,能够更加客观地反映不同近自然等级的林分类型在水源涵养能力上的差距,对研究区近天然林分进行下一步调查研究,有利于进一步提高该评价体系精度。

5 结论

(1) 本论文通过模糊物元法对祁连山东部地区森林进行水源涵养能力评价,通过欧氏距离法结合熵权法

对人工林进行近自然度评价,构建二者拟合关系,并确立了4个近自然度等级。针对祁连山林区外沿问题背景,从林分结构、生物多样性、林下更新状况、干扰程度、森林稳定性5个方面构建评价体系,相比传统的评价体系,本研究初次将森林近自然度与水源涵养能力相结合,对进一步探究水源涵养人工林的可持续经营具有重要的意义。

(2)研究区大部分人工林的近自然度评级为半天然林,其次为远天然林。当人工林近自然度评级处于人工或远天然林阶段时通过补植等措施提高其近自然度可以大幅度提高其水源涵养能力,为区域森林水源涵养能力修复的关键对象。

(3)当人工林近自然度评级为半天然林时水源涵养能力提升较为缓慢,可以通过进一步调整其混交比例,改善其林分结构提高其水源涵养能力。此外,研究仍需对近天然林分进行调查,以提高评价体系进度,并进一步探究半天然林的近自然营林措施。

参考文献(References):

- [1] 郑学良,陈丽华,李洪洋,涂志华,弓文艳,张雪琪.基于水源涵养功能的辽东防护林体系健康评价.中国水土保持科学,2020,18(2): 102-110.
- [2] 孙向阳,王根绪,李伟,刘光生,林云.贡嘎山亚高山演替林林冠截留特征与模拟.水科学进展,2011,22(1): 23-29.
- [3] Jian S Q, Zhu T S, Hu C H. Integrating potential distribution of dominant vegetation and land use into ecological restoration in the Yellow River Basin, China. Journal of Mountain Science, 2022, 19(10): 2886-2904.
- [4] 李树宝,张丽娜,王树森,马迎梅,张苗苗,马成功,于胜利.森林经营方式对不同林龄落叶松林枯落物及土壤水源涵养能力的影响.森林工程,2023,39(2): 12-21.
- [5] Winter S. Forest naturalness assessment as a component of biodiversity monitoring and conservation management. Forestry: an International Journal of Forest Research, 2012, 85(2): 293-304.
- [6] 吴银莲,李景中,杨玉萍,周志翔.森林自然度评价研究进展.生态学报,2010,29(10): 2065-2071.
- [7] 胡婷.基于自然度评价的南岭国家公园空间功能规划[D].广州:广州大学,2020.
- [8] 赵中华,刘灵,王宏翔,王千雪,胡艳波,张吉利,王春来,惠刚盈.红花岗基沙地樟子松天然林枯立木特征分析.林业科学研究,2017,30(5): 788-796.
- [9] 彭舜磊,王得祥.秦岭主要森林类型近自然度评价.林业科学,2011,47(1): 135-142.
- [10] 刘常富,张天翼.城市森林近自然度评价体系的建立.中国园艺文摘,2012,28(6): 55-57.
- [11] 许洛山,郑丽婷,叶属峰,刘翔宇,阎恩荣.中国东部10个海岛植被近自然度评价.生态学报,2021,41(9): 3713-3723.
- [12] 柴汝杉,蔡体久,满秀玲,王贺,关俊祺.基于修正的 Gash 模型模拟小兴安岭原始红松林降雨截留过程.生态学报,2013,33(4): 1276-1284.
- [13] 刘燕平,王根绪,胡兆永,郭林茂.西南山区典型森林枯落物储量及持水能力.应用生态学报,2022,33(8): 2113-2120.
- [14] 芦新建.大通县水源涵养林类型及其功能评价研究[D].北京:北京林业大学,2015.
- [15] 董立国.原状土样测定多项土壤物理性质的方法.宁夏农林科技,2019,60(4): 51-52.
- [16] 余新晓,赵玉涛,张志强,程根伟.长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究.应用生态学报,2003,14(1): 15-19.
- [17] 李永宁,张宾兰,秦淑英,李帅英,黄选瑞.郁闭度及其测定方法研究与应用.世界林业研究,2008,21(1): 40-46.
- [18] 惠刚盈.角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数.林业科学,1999,35(1): 37-42.
- [19] 汤孟平,姜明华,陈永刚,徐文兵,赵明水.不同混交度指数的比较分析.林业科学,2012,48(8): 46-53.
- [20] 惠刚盈, Klaus von Gadow, Matthias Albert. 一个新的林分空间结构参数——大小比数.林业科学研究,1999,12(1): 4-9.
- [21] 李意德,曾庆波,吴仲民,周光益,陈步峰.我国热带天然林植被C贮存量的估算.林业科学研究,1998,11(2): 156-162.
- [22] Burks A W, Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication. The Philosophical Review, 1951, 60(3): 398.
- [23] 王磊,何东进,游惠明,刘进山,蔡昌荣,游巍斌,肖石红,胡静,郑晓燕.珍稀濒危植物长苞铁杉林地枯倒木数量特征.南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(2): 164-168.
- [24] 谭继旭.青海省高寒黄土区典型小流域人工生态公益林健康评价[D].北京:北京林业大学,2020.
- [25] 曹志.基于森林健康的林分结构调控技术研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [26] 左政,郑小贤.不同干扰等级下常绿阔叶次生林林分结构及树种多样性.浙江农林大学学报,2019,36(1): 21-30.
- [27] 程唱,贺康宁,俞国峰,柴世秀.干旱半干旱区不同林型人工林水源涵养能力比较研究.生态学报,2021,41(5): 1979-1990.
- [28] 贾艳红,赵军,南忠仁,赵传燕,王胜利.基于熵权法的草原生态安全评价——以甘肃牧区为例.生态学报,2006,25(8): 1003-1008.

- [29] 王晓琪, 赵雪雁. 人类活动对国家公园生态系统服务的影响——以祁连山国家公园为例. 自然资源学报, 2023, 38(4): 966-982.
- [30] 甘小玲, 常亚鹏, 江原, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌. 气候变化对祁连山蒙古扁桃潜在适生区的影响. 生态学报, 2023, 43(2): 768-776.
- [31] McRoberts R E, Winter S, Chirici G, LaPoint E. Assessing forest naturalness. Forest Science, 2012, 58(3): 294-309.
- [32] 彭妮, 张凯, 赵国珍, 卫彩宏, 杨秀清. 交城县国有林场主要林分类型枯落物层和土壤层水源涵养功能. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(12): 122-132.
- [33] 马书国, 杨玉盛, 谢锦升, 郭剑芬, 杨智杰, 高玉春. 亚热带 6 种老龄天然林及杉木人工林的枯落物持水性能. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(2): 31-38.
- [34] Chen J S, Chen Y P, Wang K B, Wang G L, Wu J H, Zhang Y Y. Differences in soil water storage, consumption, and use efficiency of typical vegetation types and their responses to precipitation in the Loess Plateau, China. Science of the Total Environment, 2023, 869: 161710.
- [35] 杜满义, 封焕英, 裴顺祥, 张连金, 法蕾, 郭嘉, 辛学兵. 晋南不同密度油松人工林土壤水分的物理特性. 东北林业大学学报, 2021, 49(9): 72-76.
- [36] 王辉源, 宋进喜, 孟清. 秦岭水源涵养功能解析. 水土保持学报, 2020, 34(6): 211-218.
- [37] 高军, 杨建英, 史常青, 公博, 刘子敬. 密云水库上游油松人工水源涵养林林下植物多样性与土壤理化特性. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2305-2313.
- [38] 赵娜, 王俊博, 李少宁, 鲁绍伟, 徐晓天. 北京松山 4 种典型林分枯落物持水特征研究. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1139-1147.
- [39] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 张弓乔, 程世平, 徐雪飞. 基于结构参数均值的林分空间结构综合评价研究. 林业科学研究, 2023, 36(2): 12-21.
- [40] 拓行行, 李玉华, 俞翰林, 李美慧, 晏昕辉, 杨梦茹, 王子临, 温仲明, 李伟. 宁南山区华北落叶松林下草本层群落特征及其影响因素. 生态学杂志, 1-13 [2023-09-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230509.1018.008.html>
- [41] 王超, 樊琳琳, 杨健, 董阳, 谷建才. 不同经营措施对冀北山地油松林分水源涵养功能的影响. 林业与生态科学, 2023, 38(1): 1-7.
- [42] 朱柱. 青海黄土高寒区生态公益林健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [43] 张静, 贾洪文, 李远航, 左亚凡, 林莎, 王帅军, 王作泉, 贺康宁. 青海大通县典型林分的枯落物和土壤蓄水能力评价. 中国水土保持科学: 中英文, 2022, 20(2): 106-114.
- [44] 杨培松, 陈彩虹, 余济云, 唐子朝. 靖州排牙山国有林场森林自然度评价. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(5): 19-32.